

## **USO DE DATOS PASIVOS OBTENIDOS MEDIANTE DISPOSITIVOS INERCIALES PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN DEL PAVIMENTO EN CICLOVÍAS**

Mariana Valle Eguren, Pontificia Universidad Católica de Chile, mvalle2@uc.cl  
Juan Carlos Herrera Maldonado, Pontificia Universidad Católica de Chile, jch@ing.puc.cl

### **RESUMEN**

Uno de los principales factores que consideran los ciclistas al escoger su ruta es la condición de las ciclovías, ya que, al estar relacionado con las vibraciones experimentadas, afecta la comodidad del viaje. Las alternativas existentes para determinar esta condición no responden a la realidad del ciclista o son de compleja aplicación. Por esto, se propone una metodología basada en una regresión logística, que sea objetiva y específica para evaluar el estado de pavimentos en ciclovías. Los datos utilizados son recolectados en terreno mediante dispositivos inerciales. Con la metodología se identifican los necesarios para conocer el estado del pavimento, y por ende, desarrollar sistemas de gestión de pavimentos y modelos de elección de ruta de ciclistas.

*Palabras claves: Ciclovías, estado del pavimento, vibraciones.*

### **ABSTRACT**

One of the main factors that cyclists consider when choosing their route is the condition of the bike lane. This condition is related to the vibrations experienced, because they affect the comfort perceived when traveling. Unsuitable alternatives are available to measure the surface conditions. Therefore, this work proposes an objective and specific logistic regression methodology to evaluate pavement's condition on bike lanes. The data used is collected by inertial devices and recorded on field. This methodology allows the development of pavement management systems and route choice models for cyclist.

*Keywords: Bike lanes, surface conditions, vibrations.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales factores que consideran los ciclistas al escoger su ruta es la condición en la que se encuentran las calles o ciclovías. Esto se debe a que el estado de las vías se relaciona directamente con las vibraciones experimentadas por los ciclistas, lo cual afecta su experiencia y comodidad al desplazarse. (Landis *et al.*, 1997; Jensen, 2007; Lépine *et al.*, 2014; Lépine *et al.*, 2011; Martens, 2011).

La condición superficial del pavimento es una característica pocas veces considerada en el nivel de servicio de una ciclovía (Landis *et al.*, 1997; Lépine *et al.*, 2011). Sin embargo, es de gran importancia y permite desarrollar sistemas de gestión de pavimentos, aporta en la construcción de modelos de elección de ruta y entrega información que puede ser de utilidad para capacidad de ciclovías.

Actualmente, una de las formas de analizar el pavimento en ciclovías es mediante escalas basadas en inspecciones visuales, pero debido a su naturaleza este tiende a ser subjetivo (Sprinkle Consulting, 2007; Landis, 1994). Otra alternativa ha sido utilizar el Índice de Rugosidad Internacional, IRI, el cual está diseñado para automóviles con una velocidad promedio de 80 km/h, ya que se construyó para evaluar pavimentos en carretas (Barbudo *et al.*, 2015; MINVU, 2015). Sin embargo, el IRI no sirve para ciclovías debido a que la geometría y velocidades de las bicicletas difieren a la de los automóviles. (Kohler, 2015; Parkin, 2009; Martínez *et al.*, 2011). Este último aspecto es significativo ya que la respuesta dinámica de un vehículo a transitar por una superficie es altamente sensible a la velocidad de viaje de este (Fuentes *et al.*, 2010).

Por otra parte, las fallas presentes en ciclovías son distintas a las estudiadas principalmente en carreteras. En primer lugar, el principal motivo de desgaste de una ciclovía es el medio ambiente, esto debido a que no hay una exigencia estructural (excepto en lugares de ingreso o salida de vehículos). Uno de los problemas que suelen enfrentar las ciclovías son fisuras y levantamientos provocados comúnmente por raíces de árboles. Es de esperar que este tipo de situaciones se presenten dada la cercanía de las ciclovías a las áreas verdes. Otro deterioro superficial que afecta de gran manera la comodidad del ciclista son los baches. Estos suelen ser más molestos en climas lluviosos ya que acumulan agua y suelen mojar a los ciclistas (Martínez *et al.*, 2011). En estas situaciones los usuarios suelen esquivar o disminuir su velocidad para enfrentar las imperfecciones de la vía.

Alrededor del mundo se han realizado distintos esfuerzos para medir el estado del pavimento en ciclovías. En Dinamarca desarrollaron una alternativa basada en IRI. Para esto equiparon un vehículo motorizado pequeño con acelerómetros (ver Figura 1 a) y diseñaron el 'Bicycle Profile Index' (BPI). Sin embargo, lo único que se sabe es que considera un perfil longitudinal cada 2,5 cm, ya que los detalles del algoritmo para determinar este índice son secreto comercial (Kohler, 2015).

En Bélgica se utilizaron bicicletas para medir la condición superficial del pavimento de acuerdo a vibraciones experimentadas. Para lograrlo las equiparon con una tercera rueda que registraba los datos a medida que circulaba por la vía (ver Figura 1 b). Fueron un total de cinco bicicletas y eran usadas por funcionarios para ir a comprobar el estado de la ciclovía (Martens, 2011). En Australia la "Australian Road Research Board" (ARRB) utiliza un perfilómetro caminable y con los datos

recolectados calculan el IRI de la ciclovía (Cairney y King, 2003). Sin embargo, como se mencionó este índice no es adecuado para bicicletas.

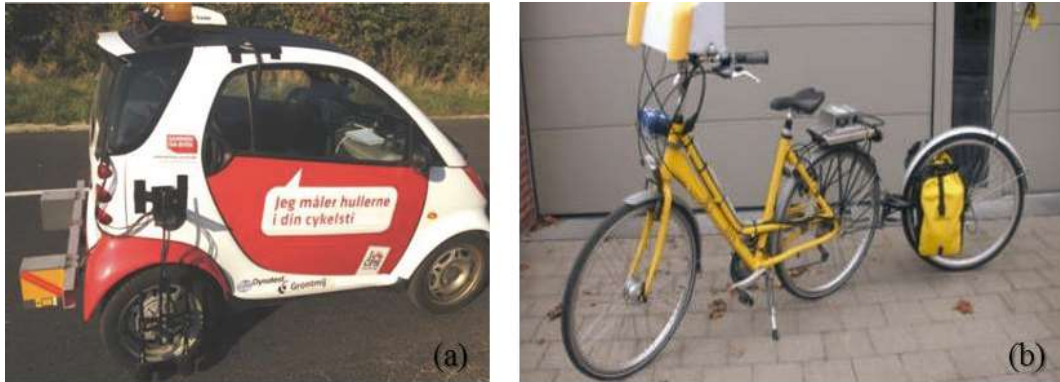


Figura 1: Vehículos equipados para evaluar la condición superficial en pavimentos  
Fuente: Kohler 2015 y Martens 2011

En Chile las bicicletas han tomado gran importancia en el último tiempo. La implementación de bicicletas públicas en varias comunas de Santiago ha impulsado la construcción de varias ciclovías en la capital. Frente a esta situación el Ministerio de Vivienda y Urbanismo desarrolló manuales de diseño y construcción de altos estándares para ciclovías. A pesar de esto, sobre la condición superficial del pavimento solo señala que al momento de entregar la ciclovías debe tener un IRI de 4 m/km (MINVU, 2015). Lo anterior no incluye revisiones para constatar el desgaste o posibles deformaciones presentes en la vía y utiliza el IRI que no es indicado para bicicletas.

Por otra parte, en Concepción se realizó un trabajo que buscaba evaluar el estado de las ciclovías a través de aceleraciones verticales obtenidas de sistemas de navegación y localización mediante satélites (*GPS, Global Positioning System*). Se clasificaron las ciclovías en tres posibles estados de acuerdo a las aceleraciones registradas, ya que estas tienen directa relación en la comodidad experimentada durante el viaje (Echaveguren *et al.*, 2015).

El propósito de esta investigación es desarrollar una metodología que sea objetiva y específica para evaluar el estado de pavimentos en ciclovías. Por esto se estudian los datos que son necesarios para identificar deterioros superficiales que se suelen presentar en estas. Con esta información sería posible la construcción de un indicador que permita inferir el estado de la superficie a partir de las vibraciones experimentadas por los ciclistas. A diferencia del caso anterior, se desarrolla un modelo capaz de identificar la ubicación de las imperfecciones del pavimento.

Se espera que esta metodología facilite la inspección y estudio del pavimento al obtenerse de forma autónoma y no invasiva mediante la recolección de datos pasivos provenientes de dispositivos inerciales. A su vez, se busca que con la información entregada por lo modelos se construya un indicador que sea capaz de establecer un nivel de servicio asociado al pavimento de una ciclovía. Este último, permitiría el desarrollo de un sistema de gestión de pavimentos para mejorar la experiencia de los usuarios, aportaría con información para la construcción de modelos de elección de ruta de ciclistas y podría ser de utilidad al momento de calcular la capacidad de las ciclovías.

El trabajo se presenta de la siguiente manera. En primer lugar se explica el experimento realizado en terreno y cómo se trabajaron los datos obtenidos de este. Luego se expone la metodología usada para desarrollar y obtener el indicador propuesto. Finalmente, se presentan los resultados preliminares obtenidos y las principales discusiones al respecto.

## 2. EXPERIMENTO Y DESCRIPCIÓN DE DATOS

Para realizar el experimento se escogió una ciclovia al interior del Campus San Joaquín de la Universidad Católica. El trayecto de la ciclovia es desde el ingreso al Campus por la calle Monseñor Carlos Casanueva hasta el estacionamiento de bicicletas en el Hall Central de la Universidad. Si bien la vía tiene una longitud total de 100 metros, se tomaron los primeros 50 metros para el estudio. Esta ciclovia tiene una superficie de rodado de asfalto, es bidireccional y se encuentra aislada del flujo vehicular por separadores físicos. Cabe mencionar que el acceso de automóviles a la vía se encuentra restringida solo a vehículos de servicio, lo que facilitó la toma de datos. En la Figura 2 se observa la vista aérea de donde se ubica la ciclovia y una fotografía con sus características.



Figura 2: Mapa de la ubicación de la ciclovia y fotografía de sus características  
Fuente: *Google Maps* y elaboración propia

A modo de identificar posibles imperfecciones en la superficie de rodado de la ciclovia se midió su perfil longitudinal. Para esto se utilizó un nivel topográfico y una mira. Las mediciones se realizaron cada 10 centímetros para obtener una alta precisión del perfil de la vía. A pesar que el método utilizado se considera poco eficiente por la literatura (Sánchez y de Solminihac, 2012), al ser un tramo corto de análisis es capaz de entregar los datos de manera precisa y eficaz. Las deformaciones encontradas son marginales para producir incomodidades en los ciclistas.

La bicicleta utilizada en el experimento fue una *Moonstone Oxford*, aro 26, con amortiguación delantera. Esta fue manejada por un único individuo de 1,74 metros de altura y 74 kilogramos de peso. Adicionalmente, se equipó la bicicleta con un dispositivo inercial, el que fue instalado debajo del asiento (Figura 3). La elección del lugar se debe a que es capaz de captar las vibraciones que se transmiten directamente al ciclista sin molestar en la conducción. Otra alternativa era el manubrio, sin embargo este presenta mayor giro que el marco de la bicicleta.



Figura 3: Diagrama de ubicación del dispositivo inercial

El dispositivo inercial utilizado fue un *smartphone*, específicamente un iPhone 4. Este teléfono cuenta con un acelerómetro, un giroscopio, una brújula y un sistema de navegación y localización mediante satélites (GPS, *Global Positioning System*). Para obtener la información del iPhone se utilizó la aplicación SensorLog (Thomas, 2017). La gran ventaja de esta aplicación es lo amigable de la interfaz que muestra gráficos en vivo. Además, almacena los datos obtenidos en un archivo .csv y la frecuencia con la que toma los datos en este caso fue de 30 datos por segundo.

Se desarrollaron cinco escenarios posibles en la ciclo vía, los cuales intentan simular distintas realidades que se presentan en las vías. El primer escenario no presenta alteraciones y busca registrar las vibraciones en un caso normal. El segundo y tercer escenario buscan representar el levantamiento del pavimento en la ciclo vía y para recrearlo se construyó un resalto de madera. Esta situación suele ocurrir por la presencia de raíces de árboles cercanos a la ciclo vía y la falta de soporte estructural de estas. La diferencia entre ambos escenarios fue la altura y ubicación del resalto. El segundo escenario tenía un resalto de seis centímetros de altura y se ubicó a 23 metros del inicio. Mientras que en el tercer escenario el resalto tenía una altura de cuatro centímetros y se encontraba a los 29 metros.

El cuarto escenario intenta representar un bache en la vía. Debido a la dificultad de generar uno y que los usuarios tienden a esquivar este tipo de deterioro, se optó por instalar conos que debían ser esquivados por el ciclista de prueba. Los conos se ubicaron a 32 metros del inicio del tramo.

Finalmente, el quinto escenario combinaba elementos anteriores. Este contaba con un resalto bajo a 30 metros del origen y con unos conos a 17 metros. La Figura 4 muestra los últimos cuatro escenarios con los elementos utilizados.

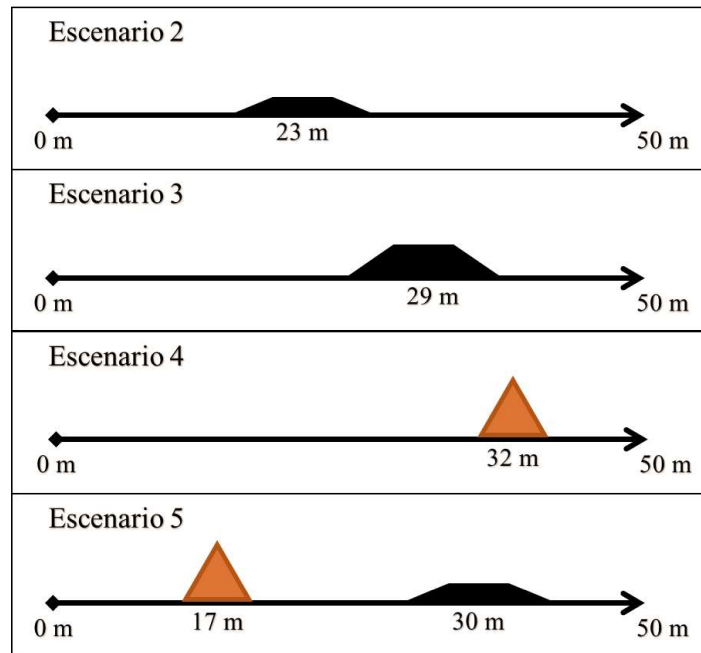


Figura 4: Diagramas de los distintos escenarios estudiados

Para cada uno de los escenarios descritos se realizaron dos repeticiones. Con esto se obtiene un total de 10 recorridos al tramo de análisis. No obstante, debido a un problema del dispositivo inercial, una repetición del primer escenario no contaba con la totalidad de datos necesarios. Por lo tanto, finalmente se cuentan con nueve recorridos.

La aplicación entrega para cada registro la hora, la velocidad, la altitud, el norte magnético, el norte real, la aceleración en los tres ejes, la componente de gravedad en cada eje, la rotación en los tres ejes y los ángulos de navegación. Sin embargo, algunos parámetros presentaban comportamientos similares, estaban estrechamente relacionado o no presentaban cambios en los distintos escenarios, por lo que fue necesaria una selección. Para esto se realizó un análisis gráfico de los datos obtenidos.

Los parámetros con los que finalmente se trabajó fueron la velocidad en metros por segundo, la ubicación geográfica en coordenadas y el verdadero norte o dirección horizontal, en azimut (360 grados). Además, se usó la rotación en los tres ejes en radianes por segundo y la aceleración en los tres ejes en G ( $G=9,8 \text{ m/s}^2$ ). Sobre esta última, cabe mencionar que al conocerse el efecto de la gravedad se le restó a la aceleración en cada eje, con lo que se obtuvo una aceleración real.

Para relacionar los datos del dispositivo inercial con los escenarios de la ciclovía fue necesario transformar las coordenadas geográficas a distancias del punto de origen. Por lo que en primer lugar, los puntos geográficos fueron desplazados al trayecto recto de la ciclovía de análisis. El algoritmo utilizado en este caso fue la distancia mínima entre la recta y el punto en cuestión. No obstante, este presenta un grado de error ya que considera la superficie de la Tierra como plana. A pesar de esto, al ser un pequeño desplazamiento este error se considera despreciable.

Una vez con los puntos corregidos en la recta se calculó la distancia entre cada uno de ellos y el punto de inicio. Para esto se utilizaron las fórmulas de *Vincenty*, las cuales consideran la Tierra como un elipsoide y entrega una precisión de 0,5 milímetros (Vincenty, 1975). Sin embargo, muchos registros compartían el punto geométrico, por lo que se realizó una interpolación entre todos los datos pertenecientes a una ubicación. Así, se obtuvo un único punto, es decir, una única distancia, para cada dato entregado.

Luego, se procedió a agrupar los datos cada 50 centímetros. Para esto se consideraron los valores comprendidos entre  $\pm 0,25$  metros para el punto cero y así sucesivamente hasta llegar al punto cincuenta. En el caso de la velocidad y el rumbo se calculó la media aritmética para cada punto, mientras que para la aceleración y rotación en cada eje se calculó la media cuadrática, ya que estos valores oscilaban en torno a cero.

De esta forma cada recorrido tiene un total de 101 puntos y como se cuenta con nueve recorridos se tiene un total de 909 puntos. Sin embargo, debido a que los primeros 10 metros se observan muchas irregularidades en cuanto a la ubicación del ciclista se eliminaron los primeros 20 datos de cada recorrido. Con esto se obtiene un total de 729 puntos.

A partir de los datos obtenidos y agrupados como se menciona previamente, se crearon dos nuevas variables. La primera de ellas es el rumbo y está estrechamente relacionada con el norte real. Esta es una variable *dummy* que indica si el ciclista cambió o no su rumbo. Para determinar este parámetro se calculó el promedio de los últimos cinco azimut y si este tenía una diferencia mayor a seis grados con el azimut en análisis se consideraba que el ciclista había cambiado su rumbo. Este se representaba con un uno en la base de datos. Esta variable se creó para poder incorporar los cambios que se observaban en el norte real registrado de una manera sencilla. En otras palabras, no interesa conocer la dirección del ciclista pero si los cambios repentinos de esta.

La segunda variable creada es la presencia de deterioros superficiales en el pavimento ( $y$ ) que es de gran importancia, ya que se espera poder predecirla en este trabajo. Esta toma valores de cero o uno, donde uno es la presencia de un deterioro o imperfección, y cero la ausencia de esta. Para construir este parámetro se utilizó el conocimiento de los escenarios simulados. En este sentido el primer escenario presenta únicamente ceros. En cuanto a la longitud que afectaban los resaltos, se consideró como suficiente 1,5 metros (equivalente a tres puntos). Por otra parte, se espera que la maniobra realizada para esquivar los conos tenga un efecto más prolongado debido a que ocurre desde antes del elemento puro y continúa después de este. Por esto el elemento en este caso tiene un largo de 2,5 metros (equivalente a cinco puntos).

Adicionalmente, se realizó una corrección en cuanto a la ubicación de cada elemento. Esto debido a que el GPS no contaba con alta precisión y los efectos de escenarios quedaban desplazados unos metros. Para esto se analizaron los datos de manera gráfica y se identificó donde se encontraba efectivamente el elemento en cuestión. A continuación, la Tabla 1 ejemplifica cómo está constituida la base de datos utilizada.

Tabla 1: Ejemplo de la Base de Datos utilizada

Y	Recorrido	Dist. (m)	Pto.	Vel. (m/s)	Giro_x (rad/s)	Giro_y (rad/s)	Giro_z (rad/s)	Acc_x (G)	Acc_y (G)	Acc_z (G)	Rumbo
0	2	13,5	27	3,57	0,09	0,10	0,19	0,20	0,23	0,17	0
0	2	16	32	3,57	0,08	0,08	0,00	0,07	0,09	0,17	0
1	3	24,5	49	3,51	1,33	0,27	0,25	0,52	1,13	0,92	0

### 3. METODOLOGÍA

Para construir un indicador que sea capaz de identificar los deterioros superficiales en el pavimento, se analizaron diferentes modelos y se escogió utilizar una regresión logística, ya que permite modelar una variable categórica que se encuentre entre 0 y 1. En este caso se desea estimar la probabilidad de que se presente o no una irregularidad superficial en el pavimento mediante máxima verosimilitud, a partir de las variables descritas en la sección anterior. Esta probabilidad se encuentra definida por la Ecuación 1, donde  $f(x)$  corresponde a una combinación lineal entre la velocidad, el rumbo, las aceleraciones y rotaciones en los tres ejes.

$$P = \frac{1}{1 + e^{-f(x)}} \quad (1)$$

Se utilizó el programa computacional Stata para la construcción de los modelos, y en primer lugar se incluyeron ocho variables en un modelo general: la velocidad (en metros por segundo), el rumbo, y las aceleraciones y rotaciones en los tres ejes. Se espera que el parámetro de la velocidad tenga signo negativo en el modelo, ya que es probable que cuando se presenta un deterioro superficial el conductor disminuya la velocidad. Los parámetros que acompañan al rumbo, las aceleraciones y rotaciones deberían tener signo positivo, debido a que al enfrentar dificultades los ciclistas suelen realizar maniobras que aumentan estas variables.

Sin embargo, es probable que muchas de las variables antes mencionadas estén relacionadas, por lo que se realizó un análisis de la correlación entre las variables (ver Tabla 2). Se consideró que las variables estaban altamente correlacionadas si presentaban valores sobre 0,5 o menores a -0,5. Para entender las relaciones entre variables es necesario conocer la dirección de cada eje con respecto al movimiento de la ciclovía, lo que se presenta en la Figura 5.

Tabla 2: Correlaciones entre variables

	Giro_x	Giro_y	Giro_z	Acc_x	Acc_y	Acc_z	Rumbo	Velocidad
Giro_x	1							
Giro_y	0,12	1						
Giro_z	0,07	<b>0,57</b>	1					
Acc_x	<b>0,53</b>	0,40	0,27	1				
Acc_y	<b>0,77</b>	0,10	0,09	<b>0,56</b>	1			
Acc_z	<b>0,61</b>	0,08	0,05	<b>0,51</b>	<b>0,72</b>	1		
Rumbo	0,00	<b>0,52</b>	<b>0,56</b>	0,20	-0,03	-0,02	1	
Velocidad	-0,10	-0,01	-0,01	-0,05	-0,05	-0,06	0,02	1





Figura 5: Diagrama de coordenadas de ejes respecto al movimiento de la bicicleta

Se observa que la rotación o giro en torno al eje 'x' está altamente relacionado con las tres aceleraciones. El giro respecto al eje 'y' está correlacionado con el rumbo y el giro en torno al eje 'z', lo que tiene sentido, ya que al desviarse del trayecto el ciclista girará en torno al eje 'y', cambiará de rumbo y tendrá un pequeño giro en torno al eje 'z'. Por esto último, el giro entorno al eje 'z' también está relacionado con el cambio de rumbo como se observa en la Tabla 2. Finalmente, las aceleraciones están correlacionadas entre ellas y la velocidad no se encuentra relacionada con ninguna de las otras variables analizadas.

Luego de construir el modelo general con las ocho variables y de ver la correlación entre ellas, se procedió a simplificar el modelo. Para esto se comenzó quitando las variables correlacionadas y aquellas que presentaban signo contrario al esperado. Otro criterio utilizado para eliminar variables fue la significancia de estas según el *test z*, donde se busca que el valor de este sea mayor a 1,96 para un intervalo de confianza del 95%.

En cuanto a los modelos en general, se usaron distintos criterios para validarlos a medida que se construían. El primero de ellos fue la prueba de ajuste general, que analiza si el modelo propuesto es estadísticamente distinto del modelo que considera solo la constante. En otras palabras, considera la capacidad explicativa de las variables independientes. El segundo criterio usado fue el valor del *pseudo R<sup>2</sup>*. Si bien en el caso de una regresión logística el valor del *pseudo R<sup>2</sup>* no es directamente la capacidad predictiva del modelo, se busca que tenga alto valor ya que se relaciona con esta capacidad.

Para comparar y elegir modelos se consideró el área bajo la curva *Receiver Operating Characteristic* (AUROC). Esta se construye a partir de la sensibilidad y especificidad del modelo. Se espera que mientras mayor el área bajo la curva, mejor será el modelo. Sin embargo, este análisis es bastante optimista, ya que se realiza con los mismos datos con que se calibró el modelo. Por esto último, es necesario comparar los modelos con datos de validación. En este caso se considera el porcentaje de verdaderos positivos de cada uno de ellos.

Adicionalmente, se usó la técnica de validación cruzada con el fin de garantizar que los parámetros obtenidos son independientes de la partición realizada a la base de datos (Devijver y Kittler, 1982). En este caso se dividieron los datos en cinco grupos o carpetas. A partir de estos, se generaron cinco semillas que utilizan cuatro grupos para calibrar el modelo y reservan el grupo restante para la validación de este. La Tabla 3 muestra el resumen de las principales características de cada semilla. El procedimiento descrito en esta sección se realizó con cada semilla.

Tabla 3: Resumen de las características de las semillas

	Cantidad de Datos		Cantidad de Deterioros*		Porcentaje de Deterioros	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Semilla 1	584	145	26	12	4 %	8 %
Semilla 2	583	146	28	10	5 %	7 %
Semilla 3	583	146	32	6	5 %	4 %
Semilla 4	583	146	33	5	6 %	3 %
Semilla 5	583	146	33	5	6 %	3 %

\*Cantidad de datos con  $y = 1$

#### 4. RESULTADOS PRELIMINARES

En esta sección se presentan los modelos obtenidos al aplicar la metodología propuesta a los datos recolectados en terreno. A continuación se presenta la forma general de los tres modelos elegidos (Ecuación 2, Ecuación 3 y Ecuación 4) y los parámetros obtenidos para cada semilla (Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6). El motivo por el cual se eligieron estos fue que cumplían los criterios descritos en la sección anterior.

Modelo A

$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 * giro_x + \theta_2 * giro_y + \theta_3 * giro_z \quad (2)$$

Tabla 4: Parámetros estimados para el Modelo A

	Constante	Giro_x	Giro_y	Giro_z
Semilla 1	-7,77	14,81	1,81*	5,73
Semilla 2	-6,95	10,51	2,69	4,69
Semilla 3	-7,77	15,57	2,54	6,24
Semilla 4	-7,12	12,62	2,21	5,68
Semilla 5	-7,45	13,26	2,54	5,69

\*significativo al 85% de confianza

Modelo B

$$f(x) = \theta_0 + \theta_4 * acc_y + \theta_2 * giro_y + \theta_3 * giro_z \quad (3)$$

Tabla 5: Parámetros estimados para el Modelo B

	Constante	Acc_y	Giro_y	Giro_z
Semilla 1	-7,74	8,58	3,71	4,00
Semilla 2	-7,36	7,43	3,74	3,87
Semilla 3	-7,67	8,66	4,42	4,55
Semilla 4	-7,51	8,57	3,68	4,43
Semilla 5	-7,92	8,92	4,23	4,52

## Modelo C

$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 * giro_x + \theta_3 * giro_z \quad (4)$$

Tabla 6: Parámetros estimados para el Modelo C

	Constante	Giro_x	Giro_z
Semilla 1	-7,59	15,54	6,71
Semilla 2	-6,72	11,69	6,55
Semilla 3	-7,45	16,60	7,55
Semilla 4	-6,88	13,46	6,91
Semilla 5	-7,21	13,98	7,76

En primer lugar, es importante notar que el modelo A y C incluyen el giro en torno al eje 'x' y el modelo restante (B) presenta la aceleración en la dirección del eje 'y'. Como se señaló previamente estas variables tienen alta correlación, lo que quiere decir que capturan el mismo comportamiento. En este caso, responden a la experiencia del ciclista al enfrentarse a los resaltos, ya que es de esperar que en esta situación aumente la aceleración en la dirección de 'y' y el giro en torno al eje 'x'.

En segundo lugar, se aprecia que el giro en torno al eje 'z' se encuentra en los tres modelos presentados. Esto es un resultado esperable, ya que esta variable se relaciona con la inclinación natural que realiza el ciclista a la hora de esquivar los conos. Al analizar el giro en torno al eje 'y' es evidente que un desvío del eje por el cual se desplaza el ciclista implique un cambio en esta, por lo que se ve afectada al esquivar los conos. Sin embargo, esta variable está presente en los modelos A y B, por lo que en el modelo C este tipo de comportamiento solo se explica mediante el giro en torno al eje 'z'.

Un factor común de las maniobras realizadas al esquivar conos o enfrentar los resaltos es la importancia que tienen los giros, independientemente de la dirección en que ocurran. En estas situaciones suele ocurrir que el ciclista experimente desequilibrios, en los cuales los giros son más relevantes que las aceleraciones.

Una variable que se esperaba tuviera importancia era la velocidad, pero los resultados muestran que no es significativa. Una posible explicación es que al enfrentar los elementos de estudio, la disminución de esta por parte del ciclista no alcanzó los niveles esperados para ser relevante. De manera similar, la variable construida para representar el cambio de rumbo tampoco resultó significativa en los modelos. Esto se puede atribuir a que el efecto captado por esta variable también se refleja en los giros en torno a eje 'y' y al eje 'z', ya que se encuentran correlacionadas.

Luego, se aplicaron los modelos a los datos correspondientes a la validación para cada semilla. Se calculó el error tipo I y el error tipo II. El primero de ellos ocurre cuando el modelo predice un deterioro, pero en la realidad esta no existe (Falso Positivo). El segundo es lo contrario, es decir, en la realidad hay una irregularidad pero el modelo no la identifica (Falso Negativo). Además, se calculó la cantidad de aciertos para los deterioros reales (Verdaderos Positivo, VP) y la cantidad total de aciertos. A continuación en la Tabla 7 se presenta los resultados obtenidos.

Tabla 7: Análisis de errores y valores positivos para cada modelo en cada semilla

<b>Semilla 1</b>	Aciertos	% de Aciertos	Error I	Error II	VP	% VP Acertados
Modelo A	137	94,5	2	6	6	50
Modelo B	139	95,9	1	5	7	58
Modelo C	136	93,8	2	7	5	41

<b>Semilla 2</b>	Aciertos	% de Aciertos	Error I	Error II	VP	% VP Acertados
Modelo A	140	95,9	0	6	4	40
Modelo B	138	94,5	0	8	2	20
Modelo C	141	96,6	1	4	6	60

<b>Semilla 3</b>	Aciertos	% de Aciertos	Error I	Error II	VP	% VP Acertados
Modelo A	141	96,6	4	1	5	83
Modelo B	143	97,9	3	0	6	100
Modelo C	140	95,9	5	1	5	83

<b>Semilla 4</b>	Aciertos	% de Aciertos	Error I	Error II	VP	% VP Acertados
Modelo A	144	98,6	1	1	4	80
Modelo B	140	95,9	3	3	2	40
Modelo C	143	97,9	2	1	4	80

<b>Semilla 5</b>	Aciertos	% de Aciertos	Error I	Error II	VP	% VP Acertados
Modelo A	142	97,3	1	3	2	40
Modelo B	141	96,6	2	3	2	40
Modelo C	140	95,9	3	3	2	40

A partir los valores obtenidos para los distintos modelos se puede concluir que ninguno de estos predomina en todas las semillas. Debido a lo anterior es necesario seguir analizando los modelos y los errores que estos comenten. En especial identificar si uno de estos suele ser más conservador o más arriesgado que los otros. En cuanto a los errores en sí, el siguiente análisis sería evaluar si un modelo reconoce mejor los distintos tipos de deterioros como los saltos o al momento de esquivar elementos de la vía. Para esto último quizás sea necesario contar con nuevos datos.

## 5. DISCUSIÓN FINAL

A lo largo de este trabajo se presentaron los distintos escenarios a los cuales se ven enfrentados los ciclistas. Con los datos obtenidos de las pruebas en terreno fue posible desarrollar modelos preliminares para determinar las variables significativas al momento de identificar deterioros superficiales en el pavimento. Si bien los resultados obtenidos son preliminares y no se puede concluir respecto a estos, la metodología utilizada fue validada con estos primeros resultados. Por lo tanto, las principales conclusiones y discusiones que se presentan a continuación son sobre esta.

Una importante ventaja de esta metodología es la facilidad para obtener los datos. En la actualidad existe gran cantidad de dispositivos inerciales que son capaces de entregar los datos utilizados en

este trabajo. Otra ventaja es que esta metodología no es invasiva, ya que permite conocer el estado del pavimento sin tener que intervenir la vía. Además, elimina la necesidad de programar visitas a terreno para conocer el estado del pavimento, sino que estas visitas se limitan a ubicaciones que presenten problemas. En otras palabras, optimiza la gestión del pavimento en ciclovías.

Uno de sus principales aportes de la metodología y modelo utilizado es la sencillez con la que se aplica y entrega información importante sobre la condición del pavimento. También hay que recalcar que esta cumple con ser objetiva y específica para bicicletas como se planteaba al comienzo del trabajo.

Uno de los problemas que presenta esta metodología es que la forma de conducir del ciclista y la bicicleta utilizada tiene influencia en los datos registrados (Lépine *et al*, 2011). Por esto, para que lo presentado tenga validez es necesario una gran cantidad de ciclistas o datos en un mismo tramo de análisis. Otra limitación propia del modelo desarrollado es que no consideras posibles irregularidades en las intersecciones. Si bien, es posible de identificas las intersecciones con las posiciones geográficas, estas suelen tener distinto diseño geométrico y por ende, el comportamiento del ciclista cambia.

Un aspecto a analizar a futuro es el tipo de pavimento y la bicicleta usada. En este sentido sería necesario realizar un experimento similar con más variables como otras superficies, otro diseño de bicicletas y más de un ciclista. De esta forma se podría calibrar un modelo más general. En la misma línea, algo que no se estudió en este trabajo es lo que sucede cuando el trayecto por donde circula es curvo, ya que variables estudiadas puede que tengan un comportamiento distinto.

Otro tema que sería interesante estudiar son nuevos problemas en el pavimento y cómo los enfrentan los ciclistas. Es decir, cómo reaccionan a situaciones distintas a las estudiadas en este artículo. Dentro de estas se podría trabajar las intersecciones.

Una futura línea de investigación incluiría vincular la cantidad de deterioros predichos con un nivel de servicio. Una vez realizado esto se puede desarrollar un sistema de gestión de pavimentos que responda a las imperfecciones detectadas en las ciclovías de manera eficiente. Adicionalmente, el nivel de servicio podría ser incluido en la construcción de modelos de elección de ruta de ciclistas y en el cálculo de la capacidad de estas.

## REFERENCIAS

- Barbudo, A., Jiménez, J. R., Ledesma, E. F., y Sierra, M. J. (2015). Regularidad superficial y adherencia en vías ciclistas - recomendaciones de diseño disponibles. **Informes de La Construcción**, 67 (540), 124-135.
- Cairney, P. y King, K. (2003). Development of a performance based specification for a major bicycle facility. Vermont, Victoria, Australia: **ARRB Transport Research**.
- Devijver, P. A., y J. Kittler (1982). **Pattern Recognition: A Statistical Approach**. Prentice-Hall, Londres.

- Echaveguren, T., Montoya, C., y Tudela, A. (2015). Evaluación de Condición Superficial de Ciclovías usando Aceleraciones Verticales Obtenidas con GPS. **Acta XVII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 1, Octubre, Concepción, 1–14.
- Fuentes L., Gunaratne M. y Hess D. (2010). Evaluation of the Effect of Pavement Roughness on Skid Resistance. **Journal of Transportation Engineering**. 136 (7), 640-653.
- Jensen, S. U. (2007). Pedestrian and Bicyclist Level of Service on Roadway Segments. **Transportation Research Record**, 2031(1), 43–51.
- Kohler, E. (2015). Medición de Irregularidad Superficial en Pavimentos de Aeropuertos, Viales y Ciclovías. **Ingeniería de Transporte**, 18(2), 21–24.
- Landis, B. W. (1994). Bicycle Interaction Hazard Score: a Theoretical Model. **Transportation Research Record**, 1438, 3–8.
- Landis, B., Vattikuti, V., y Brannick, M. (1997). Real-Time Human Perceptions: Toward a Bicycle Level of Service. **Transportation Research Record**, 1578(1), 119–126.
- Lépine, J., Champoux, Y., y Drouet, J. M. (2011). Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory. **Society for Experimental Mechanics**, 6, 263–289.
- Lépine, J., Champoux, Y., y Drouet, J. M. (2014). Road bike comfort: on the measurement of vibrations induced to cyclist. **Sports Engineering**, 17, 113–122.
- Martens, S. (2011). **Bicycles measure the quality of cycle paths in Belgium**. Eltis the urban mobility portal (<http://www.eltis.org>). [Visitado el 20/01/2017].
- Martínez Arguelles, G., Fuentes, L. G., y Torregroza Aldana, L. M. (2011). Revisión del sistema de gestión de pavimentos de la red ciclorrutas de Bogotá. **Revista ingeniería de construcción**, 26(2), 150-170.
- MINVU (2015). **Construcción de ciclovías: Estándar técnico**. Volumen 2: Espacios públicos urbanos. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile.
- Parkin, J. (2009). The humps and the bumps: objective measurement using an instrumented bicycle. **Research and Innovation Conference**, 2009.
- Sánchez, I. & de Solminihac, H. (2012). El IRI: un indicador de la regularidad superficial. **Revista de Ingeniería de Construcción**, 6, 1-17.
- Sprinkle Consulting Inc. (2007). **Bicycle Level Of Service: Applies Model**. Abril, Tampa, Florida, Estados Unidos. (<http://nacto.org/docs/usdg/>) [Visitado el 17/10/2016]
- Thomas, B. (2017). **SensorLog** (Versión 1.9.2) [Software de Aplicación Móvil]

Vincenty, T. (1975). Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. **Survey review**, 23(176), 88-93.